第 39 卷 第 3 期
2021 年 9 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 39, No. 3
Sept., 2021

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2021.03.05

射电天文相控阵馈源技术发展综述

王 凯[1,2,3]，陈卯蒸[1,2,3]，马 军[1,2,3]，宁云炜[1,2,3]，曹 亮[1,2,3]，
闫 浩[1,2,3]，李 健[1,2,3]，段雪峰[1,2,3]，项斌斌[1,2]

(1. 中国科学院 新疆天文台，乌鲁木齐 830011； 2. 中国科学院 射电天文重点实验室，南京 210033； 3. 新疆微波技术重点实验室，乌鲁木齐 830011)

摘要： 相控阵馈源是近年在射电天文领域新兴的一种阵列天线接收系统，在射电望远镜焦平面上以矩形、六边形等方式排布电小天线单元阵列。通过波束合成对各个阵元施加不同的激励，调控各个阵元的幅度与相位，使得各波束相互交叠、相位中心紧密相邻，从而能够对焦平面区域进行完全采样，实现连续的视场覆盖以提高巡天效率。从焦平面阵列出发，对比介绍了相控阵馈源及多波束技术；之后进一步详细描述了现今世界范围内相控阵馈源技术前沿研究，其中主要包括美国的 NARO，荷兰的 ASTRON，加拿大的 DRAO 和澳大利亚的 CSIRO 等研究机构在PAF研制方面的具体工作；之后介绍了国内在大科学装置及 SKA 等大科学工程推动下开展的相控阵馈源的技术预研及工程实践；最后针对现有相控阵馈源技术发展，提出了该项技术未来的研究难点及发展方向。

关 键 词： 射电望远镜；接收机；多波束技术；相控阵馈源

中图分类号： P111.44 **文献标识码：** A

1 引 言

射电望远镜可以利用其高灵敏度及分辨率对微弱的射电源进行观测，但由于望远镜的波束宽度有限，在相应天区形成的波束立体角非常小，对于需要开展大范围的巡天观测仍需要花费较多时间。改善上述情况最佳的方式就是增加望远镜的视场[1]。对于传统单波束接收机来说 (如图 1 所示)，射电望远镜的视场 F_{ov} 表示为：

$$F_{\mathrm{ov}} = \frac{\pi\theta_{\mathrm{Az}}\theta_{\mathrm{El}}}{4} = \frac{\pi\Omega}{4} \quad , \tag{1}$$

收稿日期： 2020-10-13； **修回日期：** 2020-12-16

资助项目： 国家自然科学基金 (11973078, 11903073, 11903077, U1831201)；中国科学院“西部之光”人才培养引进计划 (2020-XBQNXZ-018)；国家重点研发计划 (2018YFA0404703, 2018YFA0404704)；新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目 (2019D01A99)；中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费

通讯作者： 王凯，wangkai@xao.ac.cn

其中，$\theta_{\rm Az}$ 为水平方向上半功率波束宽度，$\theta_{\rm El}$ 为垂直方向上半功率波束宽度，Ω 为射电望远镜的波束立体角。



图 1 射电望远镜的视场

假设一次巡天观测需完成对立体角为 $\Omega_{\rm tol}$ 的扫描观测，完成该区域的扫描所需要花费总的时间 $t_{\rm tol}$ 可表示为[2]：

$$t_{\rm tol}=\frac{\Omega_{\rm tol}}{\Omega}\cdot t=\frac{\Omega_{\rm tol}}{\Omega}\cdot\frac{(k\cdot T_{\rm sys})^2}{{A_{\rm e}}^2\cdot B}\quad, \tag{2}$$

其中，k 为玻尔兹曼常数，t 为一次观测的积分时间，B 为观测带宽，$A_{\rm e}$ 为射电望远镜的有效面积，$T_{\rm sys}$ 为系统的噪声温度。

对于传统单波束接收机来说，整个望远镜系统的巡天速度 $S_{\rm s}$ 表示为[3]：

$$S_{\rm s}=\frac{\Omega_{\rm tol}}{t_{\rm tol}}=\frac{{A_{\rm e}}^2\cdot B}{(k\cdot T_{\rm sys})^2}\cdot\Omega\quad. \tag{3}$$

一个简便的增加射电望远镜视场的方法，是在现有的反射镜望远镜的焦平面上放置多个馈源，组成焦平面阵列，即多波束技术[4]。这种方法现已广泛应用于射电天文接收机系统中，其工作频段可达亚毫米波段。那么，对于具有 N 个相同波束的多波束接收机来说，整个望远镜系统的巡天速度可表示为：

$$S_{\rm s}=\frac{{A_{\rm e}}^2\cdot B}{(k\cdot T_{\rm sys})^2}\cdot\Omega\cdot N\quad. \tag{4}$$

从公式 (4) 可以看出，对于具备多波束接收机的射电望远镜来说，其巡天速度与观测的波束数量成正比，因此，采取多波束技术是提高射电望远镜巡天速度最有效的方法。

2 多波束接收机

与传统单波束相比，多波束接收机可以实现焦面场上多个阵列接收机同时工作[5]。根据系统组成不同，多波束接收机包含焦平面阵列馈源和相控阵列馈源两种形式。

2.1 焦平面阵列

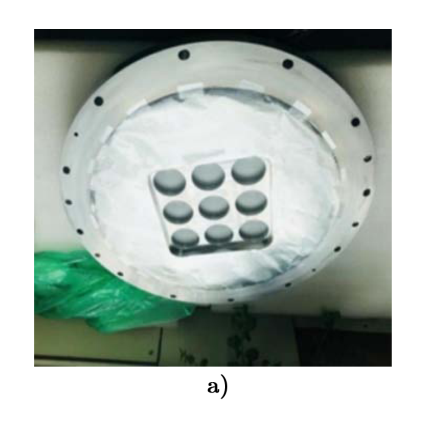
焦平面阵列馈源的概念最早起源于光学和红外波段上使用的功率探测器以及辐射计应用，包括卫星地面站所使用的双馈源或者 4 馈源系统。1975 年，Condon 首次在美国 Arecibo 球面望远镜上探索使用多波束接收机。1983 年，荷兰的 Arnold van Ardenne 开始了多波束毫米波接收机的研究工作。1987 年，美国国家射电天文台 (National Radio Astronomy Observatory, NRAO) 开始研制 5.85 GHz 的 7 波束接收机，并安装于 Green Bank 300 ft 天线上开展测试，之后将其运至澳大利亚 Parkes 64 m 天线上进行巡天测试。1987 年，Arnold van Ardenne 开始为麦克斯韦望远镜 (James Clerk Maxwell Telescope, JCMT) 研制 350 GHz 阵列接收机。1988 年，NRAO 研制的基于肖特基混频器的 8 波束 230 GHz 接收机问世。上述发展历程只能作为多波束接收机的样机研制阶段，1997 年初，澳大利亚 Parkes 64 m 射电望远镜成功安装了 13 波束接收机 (21 cm 波段)[6]，这才是世界范围内真正意义上的第一台实用型多波束接收机，主要用于开展 HI 及脉冲星巡天观测，13 波束接收机如图 2 所示。2005 年，一个同样版本的 13 波束 L 波段接收机被安装于 Arecibo 望远镜上。随后，德国 Effelsberg 及美国绿岸射电望远镜 (Green Bank Telescope, GBT) 都相继装备了多波束接收机。



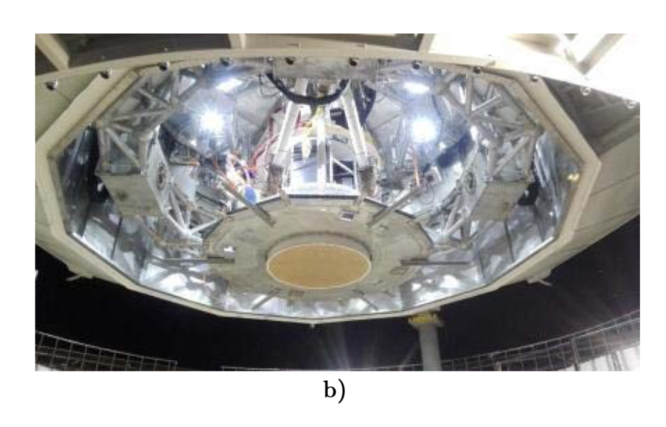
图 2　澳大利亚 Parkes 13 波束接收机

国内方面，中国科学院紫金山天文台在德林哈 13.7 m 射电望远镜上装备的 9 波束接收机是国内第一台自研的多波束接收机系统[7]，其工作频率为 85～115 GHz，主要用于分子谱线观测，见图 3 a)。中国科学院国家天文台 (简称国家台) 的 500 m 口径球面射电望远镜

(five-hundred-meter aperture spherical radio telescope, FAST) 作为世界上最大的单口径射电望远镜，目前已成功安装澳大利亚研制的 19 波束 L 波段接收机[8]，该接收机具备 19 波束双极化输出，工作频率为 1 050～1 450 MHz，采用喇叭馈源设计，馈源后级连接正交模耦合器及 HEMT 低噪声放大器 (工作在 20 K 低温环境)，如图 3 b) 所示。中国科学院上海天文台 (简称上海台) 天马 65 m 望远镜已装配 3 台双波束接收机，分别为 K, Ka, Q 波段接收机，目前正在研制 7 波束 K 波段接收机。



a)



b)

图 3 德令哈 13.7 m 天线 9 波束与 FAST 19 波束接收机

对于多波束接收机来说，每个波束单元均是一个性能良好的馈源，各单元相互独立，使用该技术可以大幅提高巡天观测效率。但由于良好的波束照明需要足够直径的馈源，而相邻馈源间由于其物理尺寸限制，每个馈源经望远镜形成的波束在天区上被分开，从而使得视场不够连续，不能形成连续的天区覆盖[9]。

2.2 相控阵馈源

相控阵馈源 (phased array feed, PAF) 是近些年一项热门的接收机技术，它是利用反射面望远镜结合波束合成技术在天空形成多个连续波束的新的焦平面阵列。PAF 一般在射电望远镜的焦平面上以矩形、六边形等方式排布电小天线单元阵列，通过波束合成对各个阵元施加不同的激励，调控各个阵元的幅度与相位，实际就是焦平面上一个小型的相控阵天线。天线的相位中心紧密相邻，波束相互重叠，从而能够对焦平面区域进行完全采样，提供连续视场以提高巡天效率，解决了传统多波束接收机因馈源相互分立而不能实现真正意义上的连续大视场的问题[10]。

对于射电望远镜 PAF 接收机系统来说，波束合成作为一项关键技术将会直接影响整个 PAF 系统的灵敏度、系统噪声及观测效率。对于一个 PAF 接收机来说，假设接收的信号为一个平面波，每个阵元天线的信号输出 $z(t)$ 可以定义为：

$$z(t) = s(t) = a(\theta)s_{\rm b}(t)\exp({\rm j}\Omega_0 t) \quad , \tag{5}$$

其中，$s(t)$ 表示为在中心频率为 Ω_0 的一个带通信号，$a(\theta)$ 为方向向量，其取决于 Ω_0 和方向仰角 θ，$s_{\rm b}(t)$ 为基带包络。

对于具有 M 个阵元的多路信号而言，$z(t)$ 可以表示为：

$$z(t)=\sum_{i=1}^{M}a(\theta_i)s_i(t)=\left[a(\theta_1)\cdots(\theta_M)\right]\begin{bmatrix}s_1(t)\\ \vdots\\ s_M(t)\end{bmatrix}=A(\theta)s(t)\quad . \tag{6}$$

波束合成就是通过赋权调整合成波束中各个阵元的输出以调控 $s(t)$[11]，表示为：

$$\hat{s}(t)=\sum_{i=1}^{M}w_i^*z_i(t)=w^Hz(t)\quad , \tag{7}$$

其中，波束合成权向量为 $w=[w_1,...,w_M]^T$，阵列中第 i 个阵元在整个合成波束中被赋权的权值 w_i 表示为：

$$w_i=\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\Omega_0\tau(\theta,i)}\quad , \tag{8}$$

其中，τ 为时间延迟。

从 PAF 发展历程来说，早在 1982 年 NRAO 技术讨论会上，Weinreb 就首次提出使用 PAF 进行天线面型修正。1988 年，Cornwell 和 Napier 出版了焦平面相干理论，以纠正像差、畸变等，并提出 PAF 可以放置在焦平面上以用作小型相控阵。1993 年，澳大利亚 Parkes 64 m 天线考虑过 PAF 设计方案，但又被 Trevor Bird 和 Geoff Poulton 提出的多馈源机载卫星所用的多波束方案所代替。1995 年，在 NRAO 召开的射电望远镜多馈源系统会议上，Rick Fisher 提出 PAF 阵元设计。2004 年，为开展平方公里阵 (square kilometre array, SKA) 巡天，SKA 欧洲委员会提议使用 PAF 进行观测。2006 年，澳大利亚提议为 ASKAP 使用 PAF 接收机[12]。图 4 为 SKA 部分参与机构携其 PAF 样机齐聚澳大利亚。



图 4　SKA 部分参与机构设计的 PAF 样机

3　相控阵馈源接收机发展现状

虽然相控阵馈源技术已广泛应用于卫星、通信等领域，但由于射电天文的应用背景和需求与上述领域存在明显差异，将其应用于射电天文观测还需要开展大量实践工作。为此，国

际射电天文界一直都在进行相控阵馈源技术相关的理论和实践研究。国外开展 PAF 相关工作的国家主要有美国、荷兰、加拿大和澳大利亚。在国内，上海台为天马 65 m 望远镜已开展 PAF 相关的研究工作，国家台 FAST 技术团队及国内相关科研院所已开展 L 波段相控阵馈源的研发，国内 SKA 团队也在积极参与 SKA 相控阵馈源工作包，主要用于开展 SKA 射频前端的预先研究。

3.1 国外发展现状

3.1.1 美国

20 世纪 90 年代末，美国即开始 PAF 的研发工作。1996 年，美国 NRAO 的一个研究团队设计了一款概念验证式全采样 PAF 接收机，该接收机由 19 个正弦天线单元组成，以 0.7 倍波长的阵元间距六边形排布，工作频率在 1.4 GHz[13]。2000 年，该 PAF 的第一版常温样机研制完成，并在绿岸 (Green Bank, GB) 的 43 m 天线上进行波束合成和望远镜校准方法测试，如图 5 所示。

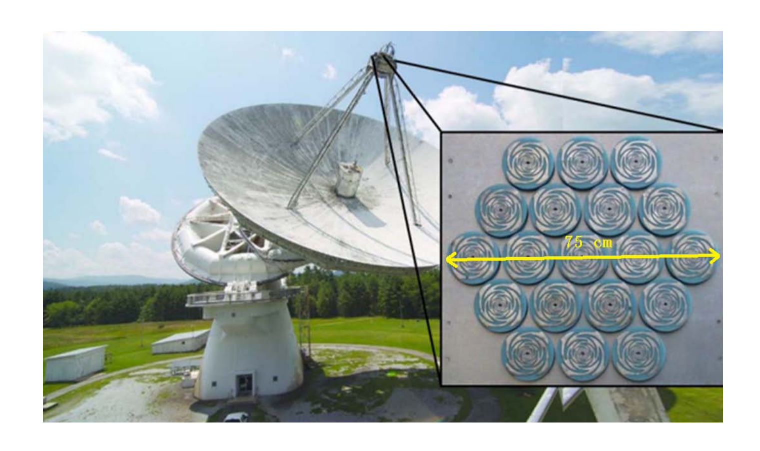


图 5 NRAO 安装于 43 m 天线上的第一版 PAF 样机

NRAO 的研究重点是针对大型单面板射电望远镜 (GBT) 开展制冷 PAF 研制。与非制冷 PAF 相比，制冷 PAF 具备更高的灵敏度和更低的系统噪声温度。在上述第一版 19 阵子常温 PAF 样机的基础上，NRAO 和杨百翰大学 (Brigham Young University, BYU) 开展合作，一直在不断进行 19 阵子制冷 PAF 设计工作。如图 6 所示，从左至右分别为 2007 年薄偶极子 (dipoles) PAF 样机[14]、2010 年阻抗优化的厚偶极子 PAF 样机[15]、2015 年使用 SiGe 低噪声放大器的双极化偶极子 GBT 1 版 PAF 样机[16]，以及 2016 年由 BYU 最终优化后的、采用制冷低噪放的双极化偶极子 GBT 2 版 PAF 实用型接收机[17]。

2016 年最终采用的双极化偶极子的 PAF 接收机也被称为 GBT 焦平面阵列 (focal L-band array for GBT, FLAG)，主要包括 PAF 前端、光传系统以及数字终端。其中 PAF 前端系统主要包括前端-模拟子系统、PAF 阵列和 LNA 等；光传系统主要由数字化仪，光纤链路，多相滤波器组 (频率、通道) 组成；数字终端主要用于实现相关、波束合成、数据格式规范，以及磁盘存储功能。

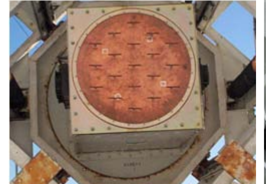





图 6　NRAO 四版 19 阵元 PAF

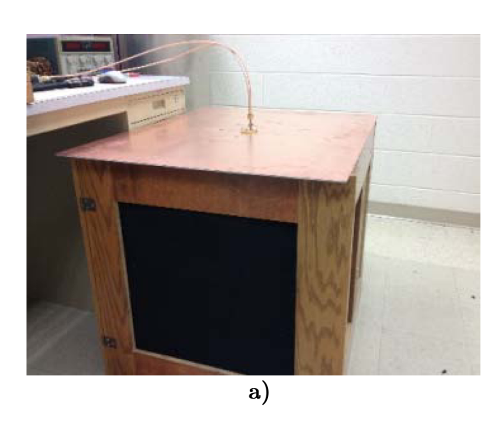
从 FLAG 阵元设计上来说，虽然上述 4 版 PAF 样机的阵子均采用偶极子天线设计，但前后就有 7 个设计版本，足以见证 PAF 从概念设计到投入实践应用所经历的漫长过程。如图 7 所示，FLAG 阵子从最早的单极化到双极化，从细瓣到粗瓣 (有助于表面电流传导)，从单独阵子到阵子与 LNA 结合设计 (以此缩减传输链路以减小损耗)，最终还需考虑 LNA 制冷及相应的隔热设计。

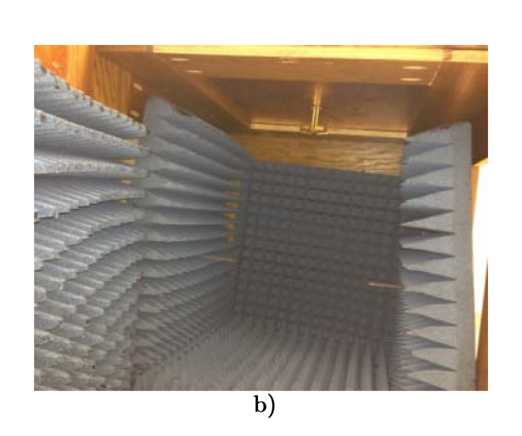




图 7　FLAG 多版阵子优化设计

杨百翰大学在实验室自行搭建的小型暗室 (见图 8)，用以开展独立阵子的天线性能测试。可以看到 GBT 2 版阵子在内侧顶端，其余位置为吸波材料。以此，可以在实验室内开展阵子的 S 参数测量。

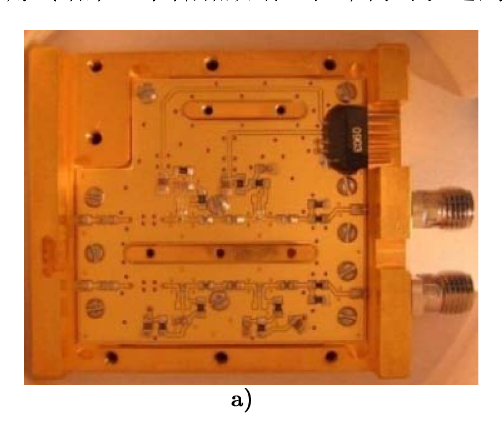

a)

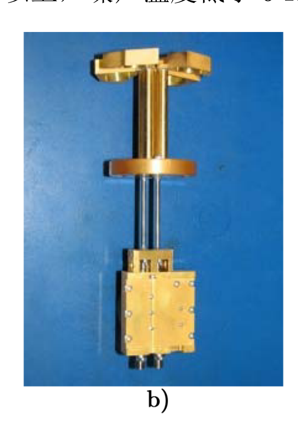

b)

注：a) 暗室外观；b) 暗室内侧。

图 8　GBT 2 版阵子 S 参数测量环境

FLAG 采用的双极化偶极子结合低噪声放大器设计 (见图 9)，最终输出两路放大后的信号。这种结构设计的优点在于，缩减了阵子与低噪放之间的链路损耗，而且方便进行制冷设计，最终测试结果显示低噪放增益在带内可以达到 35 dB 以上，噪声温度低于 6 K[18, 19]。


a)


b)

注：a) 为双路低噪声放大器电路；b) 为偶极子与低噪放整体结构。

图 9 LNA 电路及其与阵子集成设计

FLAG 的终端开发主要由 NRAO 协同 BYU 与西弗吉尼亚大学合作开发，该终端设备开发是基于混合现场可编程门阵列和图形处理单元技术的宽带实时信号处理后端。图 10 给出相关器和波束合成器所组成的 FLAG 数字终端。



图 10 FLAG 数字终端系统

FLAG 采用阵元复用方式，在 19 个阵子中由 7 个相邻阵子合成 1 个波束。FLAG 采用最大信噪比波束合成方式，在 1 404 MHz 观测 3C295 瞬时形成的 7 个合成波束方向图 (见图

11 a))，图 11 b) 为整个视场范围内的 FLAG 灵敏度观测结果，右侧单位为 $m^2 \cdot K^{-1}$。

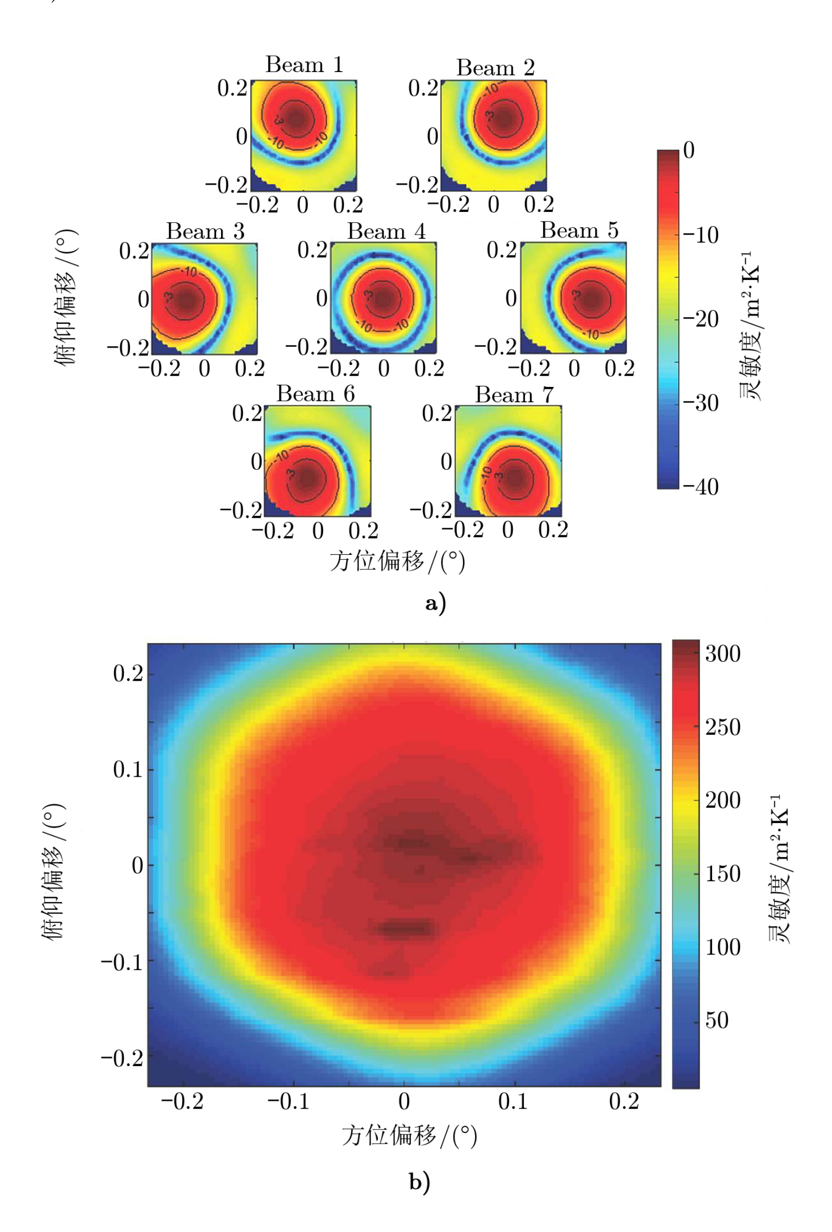


图 11　FLAG 波束合成方向图及灵敏度

3.1.2　荷兰

SKA 是由全球 20 个国家 67 个科研机构的天文学家和工程师参与建设的、世界上最大的综合孔径射电望远镜项目。SKA 拟建设低频孔径阵列、中频孔径阵列和中频反射面天线阵列三种接收天线阵列，接收面积达到 1×10^6 m^2 量级，频率覆盖 70 MHz～20 GHz。自 1993 年 SKA 被提出，SKA 参与国及其研究机构在 SKA 发起、选址、工程概念及技术研发

等方面均开展了大量的工作。根据规划，每台 SKA 反射面天线将配备 5 个单波束馈源以获得高的单波束灵敏度，或 3 个相控阵馈源以获得大视场观测能力，从而使 SKA 在灵敏度和巡天效率方面比现有射电望远镜大幅提高[20]。可以说 SKA 项目是相控阵馈源接收机在射电天文领域应用的重要推手[21]。

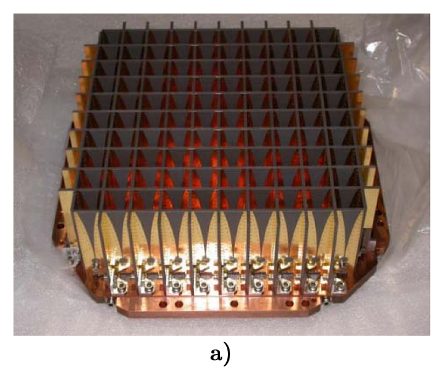
2002 年，在 SKA 射电天文欧洲委员会项目的合作伙伴专注于多波束技术时，荷兰作为 SKA 成员国之一，其荷兰射电天文研究所 (Netherlands Institute for Radio Astronomy, ASTRON) 则已经开始研发更具挑战性的致密相控阵馈源接收机。ASTRON 为射电天文焦平面阵列 (focal-plane arrays for radio astronomy: design, access and yield, FARADAY) 项目设计的第一款 PAF 样机[22]，工作带宽为 2 ～5 GHz，由 112 个 Vivaldi 天线单元组成，13 个阵元可以通过模拟波束合成器合成一个波束，并在韦斯特堡综合射电望远镜 (Westerbork synthesis radio telescope, WSRT) 上得到了验证。但由于 FARADAY 设计中使用了常温低噪声放大器 (非制冷)，这使得最初的样机并没有达到与传统喇叭馈源相当的接收机噪声性能，但是 PAF 技术的应用很大程度提升了望远镜的效率和视场，这些性能指标的提升在当时很好地激发技术人员参与到 PAF 的研发中去。图 12 为 2005 年在 WSRT 25 m 天线上安装常温 PAF 样机进行测试的现场照片。ASTRON 在 WSRT 的测试结果证明，与传统的单波束馈源喇叭相比，致密型 PAF 在宽频带上具备提供更高天线效率的潜力。

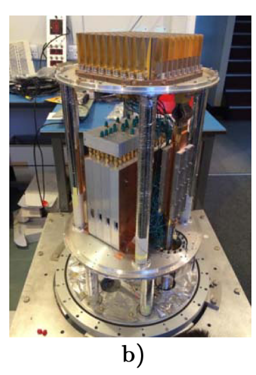


图 12　安装于 WSRT 的 FARADAY 常温 PAF

而上述 FARADAY 项目的 PAF 样机仅作为 SKA 欧洲委员会射频网相控阵 (radioNet phased arrays for reflector observing systems, PHAROS) 工程的预研部分，之后 ASTRON 联合 PHAROS 工程合作伙伴 (英国、意大利、波兰和澳大利亚) 进一步推进制冷 PAF 的研制工作[23, 24]。2006 年，ASTRON 为 PHAROS 工程研制了第一版低温制冷 PAF 样机，该样机由 144 个 Vivaldi 天线作为阵元，其工作带宽 4～8 GHz，经波束合成后可瞬时形成四个交叠的波束，低噪声放大器工作在 20 K 的低温环境。ASTRON 为 PHAROS 工程研制的制冷 PAF 样机，如图 13 所示，a) 为 PAF 阵列，b) 为低温杜瓦内部结构，c) 为杜瓦安装完

毕后的制冷 PAF。该制冷样机之后被运至英国曼彻斯特的德雷尔班克天文台 (Jodrell Bank Observatory, JBO) 并进行了相关的测试工作。


a)

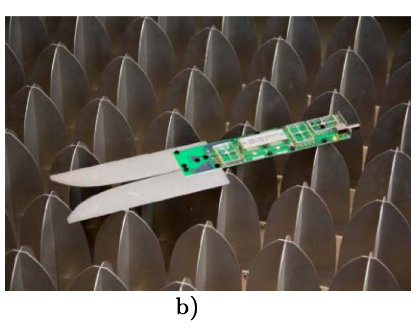

b)

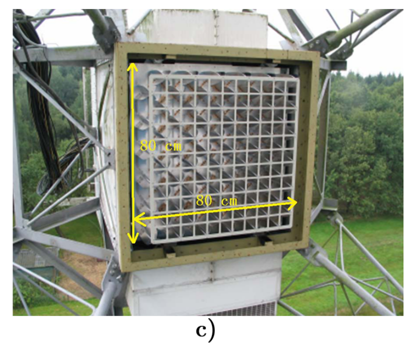

c)

图 13　PHAROS 工程的第一版制冷 PAF 样机

2008 年，ASTRON 开始为 WSRT 的综合孔径项目 (aperture tile in focus, APERTIF) 开发实用型 PAF 接收机[25]。该 PAF 工作频率为 1.13～1.75 GHz，由 121 个 Vivaldi 天线阵元组成 (见图 14 a))，阵列面积约为 80×80 cm^2，采用的室温低噪声放大器连接到每个阵元天线上 (见图 14 b))，以放大接收信号并过滤带外干扰，放大的信号通过同轴射频电缆传输到每个天线外，再经进一步放大、滤波并转换到中频信号 (400～800 MHz)，后经 8 bit 及 0.8 模数转换器数字化后被分割成 512 个子带，其中 384 个子带被用于波束合成 (300 MHz 带宽)，经波束合成后的信号被传送至 20 KHz 的频率通道中进行相关处理，然后对相关后的数据进行临时存储；上述过程为 PAF 实时处理部分，而在离线处理中主要开展干扰信号的检测和移除以及自校准，最后将标定后的数据成图并保存[26]。APERTIF 项目 PAF 接收机之后被成功安装于 WSRT 12 个 25 m 天线上 (见图 14 c))，系统温度 70 K，孔径效率 75%，双线极化输出，成功实现了数字波束合成方法并取得了初步结果，瞬时波束可以达到 37 个双极化，视场为 8 平方度。该项目最终于 2014 年底通过验收，并逐渐进入推广阶段[27]。


a)


b)



c)

图 14　APERTIF 项目研制的实用型 PAF 接收机

图 15 a) 为 WSRT 安装 APERTIF 项目研制的实用型 PAF 接收机后单面板天线灵敏度，图 15 b) 为 MFFE 和 APERTIF 系统灵敏度比对，从图中可见，虽然 APERTIF 的单面板灵敏度略低，但是在带内波动明显好于 MFFE，更为平坦，非常适合宽带校准。

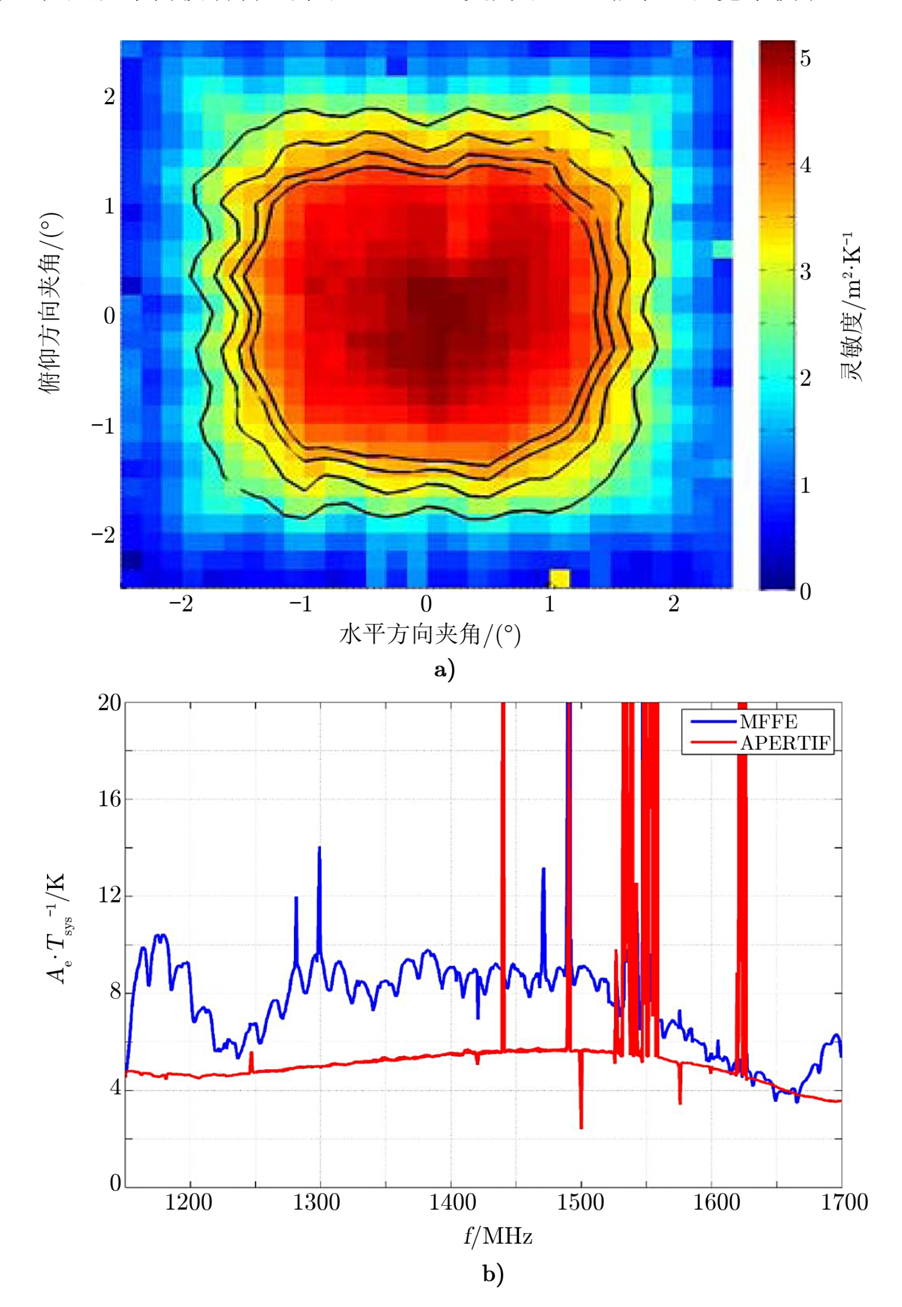


图 15 APERTIF 系统灵敏度及其带内比对结果

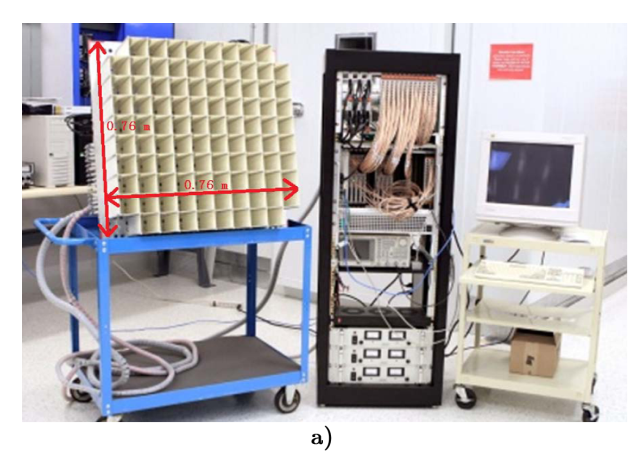
目前，荷兰 ASTRON 正联合意大利国家天体物理研究所、英国曼彻斯特大学、马耳他

大学和查尔默斯大学 (瑞典) 开展 PHAROS 2 项目的 PAF 样机研发工作。PHAROS 2 项目作为 PHAROS 的升级版，研制目标是一款工作在 4～8 GHz、具备数字波束形成的低温制冷 PAF，该设备将会作为 SKA 优先仪器 PAF 研发项目进行开发[28, 29]。PHAROS 2 拟安装在英国 76 m 射电望远镜主焦位置开展技术和科学验证。

3.1.3　加拿大

作为 SKA 成员国之一，加拿大的射电天体物理天文台 (Dominion Radio Astrophysical Observatory, DRAO) 在相控阵馈源方面也进行了大量的研究工作，其主要包括相控阵样机 (phased array demonstrator, PHAD)[30] 和焦平面阵列样机 (advanced focal array demonstrator, AFAD) 项目[31]。

2009 年，DRAO 开展首台具有离线数字波束合成能力 PAF 样机 (PHAD) 的工程实践，主要用于有关校准和波束合成、效率和系统噪声优化等方面，并未直接应用于天文研究，因此在系统温度、波束合成及处理带宽等方面可有一定妥协。该 PHAD 工作频率为 1～2 GHz，由 180 个 Vivaldi 天线组成双极化阵列，阵元间距为波长的一半，每一个天线单元之后对应连接一个 LNA，阵列尺寸为 0.76×0.76 m^2。图 16 a) 为 PHAD 阵列及其数字信号处理器和数据记录系统，b) 为 PHAD 使用的、在低损耗微波印刷电路板材料上制造的 Vivaldi 天线[32]。PHAD 选择 Vivaldi 作为阵元，是因为其具有宽带特性且具备较好的辐射效率，而且较为适合致密阵排布[33]。作为 PAF 样机，PHAD 暂时采取离线方式进行波束合成。



a)


b)

图 16　PHAD **系统样机及其** Vivaldi **阵元天线**

之后，DRAO 将 PHAD 样机安装在 10 m 反射面天线 MkII 上并进行了测试。该天线同样是 DRAO 于 2008 年为 SKA 研制的，并由碳纤维增强复合材料制成，采取整体成型技术。其也是继 2007 年 DRAO 建造第一版天线 MkI 后的改良版，重量仅为 1 000 kg，主要目的是用于开展 PHAD 的相关测试[34]。图 17 为 10 m MkII 天线及其上安装的 PAF 样机。

2011 年，在 PHAD 样机的基础上，DRAO 开始研制下一版 AFAD，它是一种符合射电天文观测灵敏度和带宽指标的 PAF 样机。AFAD 工作频率为 0.7～1.5 GHz，阵元间距为

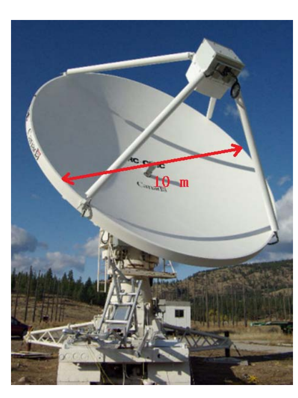
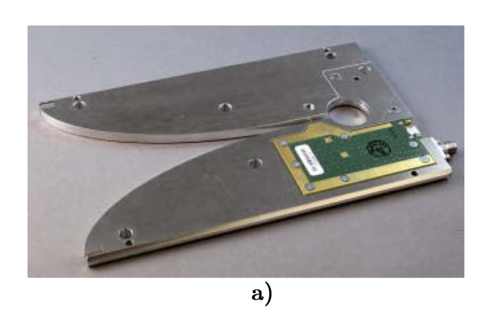


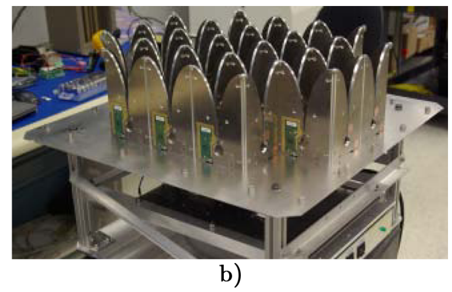


图 17 MkII 天线及其上安装的 PHAD

10 cm (波长/2 @1.5 GHz)，双线极化输出，处理带宽为 0.5 GHz，阵列尺寸小于 1×1 m^2，初步设计由 128 个 Vivaldi 阵元组成。频率选择范围主要考虑覆盖 HI 线在 1.42 GHz 的高频端并向下延伸以观察氢线红移。此外，也希望可以使用 AFAD 开展偏振观测。由于受普通 10 G 光纤链路数据速率限制，AFAD 只有部分阵元信号数字化后被传输到波束合成网络[35]。在天线阵子与低噪声放大器集成设计中，前一版的 PHAD 由于低噪声放大器位于距 Vivaldi 阵元馈电点几厘米的地方，加之 PHAD 工作于室温下，较长传输线损耗导致系统温度显著升高。AFAD 的设计将低噪声放大器尽可能靠近 Vivaldi 阵元馈电点，从而降低传输线损耗，并且通过增加 Vivaldi 阵元的厚度 (用 5 mm 厚的固体金属制造元件而不是印刷电路板或厚度小于 1 mm 的金属板)，从而增加电流流过的表面积，且以此减少开槽线损耗。另外，这种增加 Vivaldi 阵元的厚度，可以允许 LNA 嵌入其中，并提供良好的电磁屏蔽，如图 18 a) 所示，这也是 DRAO 第一次尝试在一个已知 Vivaldi 阵元内集成 LNA[36]。图 18 b) 是 41 个阵子的 PHAD 样机，起初低噪声放大器用的均是 Avago LNA ICs，之后将阵列中间 9 个阵子连接的低噪放更换成 CMOS LNA (来自 Calgary 大学) 而实现了更好的结果[37−39]。



a)

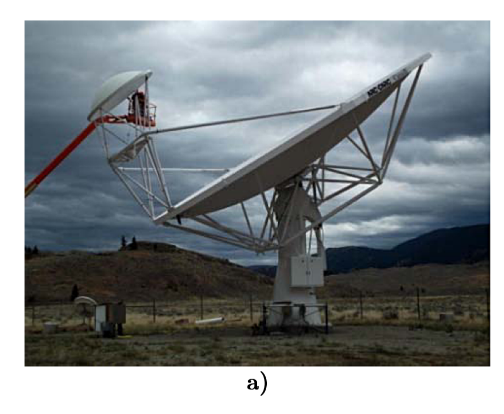


b)

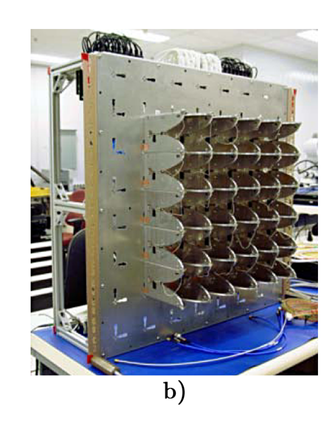
图 18 Vivaldi 阵元内嵌 LNA 设计及 41 阵元样机

之后，DRAO 继续优化 AFAD 样机阵列尺寸，以获取更高的接收机灵敏度，包括将之前的模拟波束合成方式过度为数字波束合成网络，并希望可以应用于实际天文观测。DRAO 第二阶段 AFAD 样机计划实现 88 个改进后的 Vivaldi 阵子，所有的阵子均内嵌 CMOS 低噪

放并采用数字波束合成技术，拟装备在 DVA-1 天线 (见图 19 a))、在 1.5 GHz 观测频率形成 3×3 个波束。该 AFAD 样机在实际测试中，由于静电导致部分阵子在装配时被毁坏，故此最终安装的PAF样机为 60 阵元的 Vivaldi 天线阵列，其中 30 个 Vivaldi 天线连接 CMOS 低噪放，另外 30 个 Vivaldi 天线连接 GaAs 低噪放 (见图 19 b))。



a)



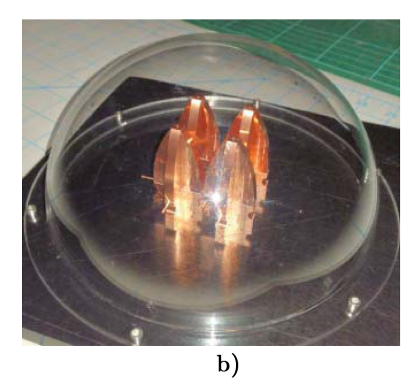
b)

图 19　DVA-1 天线及 60 阵元 AFAD 样机

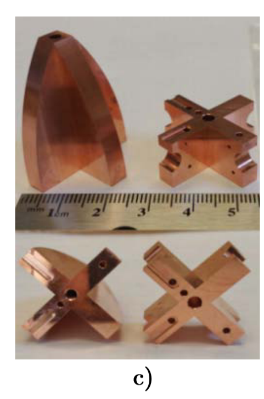
由于常温 PAF 噪声温度偏高，很大程度上影响其广泛应用。2017 年，DRAO 又开始进行 2.8～5.18 GHz 的全制冷 PAF 样机 (cryoPAF4) 研制。该 PAF 样机为双线极化设计，由 140 个 Vivaldi 天线阵元及其后级低噪声放大器组成，阵元天线及低噪声放大器全部制冷，接收机噪声温度预估为 11 K (见图 20 a))。整个阵列位于直径 480 mm 的圆柱形杜瓦瓶中，杜瓦瓶上覆盖有射频透明真空窗 (见图 20 b))。在每个金属 Vivaldi 天线元件内集成了一个宽带两段同轴馈线 (见图 20 c))，以承受低温环境，并提供 50 Ω 的阻抗，以连接到阵列天线的后级部分。cryoPAF4 设计的数字波束合成网络，可执行数字化、频带选择、波束合成和阵列校准等功能。DRAO 拟将 cryoPAF4 应用于 15 m 格里高利双反射镜望远镜上，可形成 18 个连续交叠的波束，与具有相同系统温度的传统单波束接收机相比，视场预计可增加 8 倍。



a)



b)



c)

图 20　DRAO 正在研制的 cryoPAF4

3.1.4 澳大利亚

澳大利亚联邦科学与工业研究组织 (Commonwealth Science and Industrial Research Organization, CSIRO) 的澳大利亚国家射电望远镜中心 (Australia Telescope National Facility, ATNF) 一直在积极探索扩大射电望远镜视场的技术与方法，这其中包括现有 Parkes 64 m 射电望远镜中的 13 波束 L 波段接收机和 SKA 提出的大数量、小口径 (large-number, small-diameter, LNSD) 方案中的相控阵馈源。

作为 SKA 的发起国之一，澳大利亚一直致力于 SKA 的研发工作，是 LNSD 方案的代表国家。2007 年，澳大利亚 ATNF 开始了一项名为澳大利亚 SKA 先导项目 (Australian SKA pathfinder, ASKAP)，由澳大利亚 CSIRO 协同国际合作者共同开发，其中包括加拿大、荷兰和德国。ASKAP 作为 SKA 先导单元，计划安装 36 个 12 m 抛物面天线，每台天线上配备 0.7～1.8 GHz 相控阵馈源接收机进行观测，台址部署在西澳大利亚内陆地区一个新的无线电保护区。ASKAP 建成后将成为世界上最快的谱线巡天观测设备[40]。

ASKAP 上装配的相控阵馈源是该项目研制的核心装置。ASKAP 第一版 PAF (MkI) 选择的结构是一个 5×4 单元双极化棋盘式阵列，阵列天线设计在一个薄的电介质片上，由一个棋盘形的方形导电片印刷电路板组成 (见图 21 a)) 。整个 PAF 前端由印刷电路板、泡沫和接地板组成 (见图 21 b))，以此形成一个坚固且易于制造的设计结构[41, 42]，阵列后级采用室温差分低噪声放大器。该项工作补充了荷兰 ASTRON 和加拿大 DRAO 的基于 Vivaldi 阵元的 PAF 研制工作。2012 年，ASKAP 第一版 PAF 样机被安装于西澳大利亚默奇森射电天文观测站 (Murchison Radio-astronomy Observatory, MRO) 现场，如图 21 c) 所示，经 12 m 天线安装并测试后，该 Mk I 原型样机已成功实现大约 30 平方度的视场。

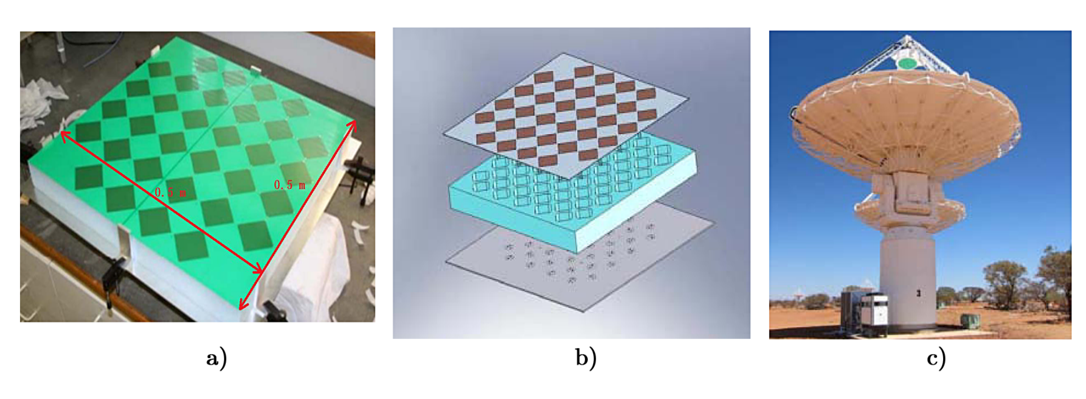
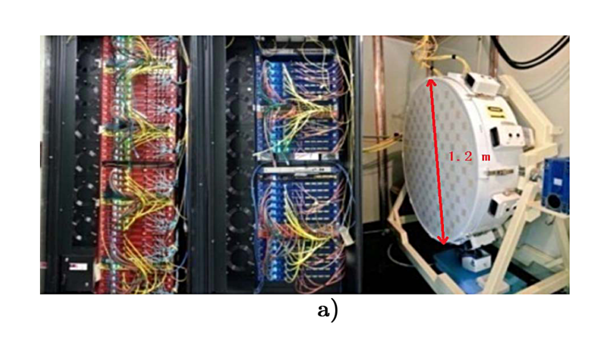


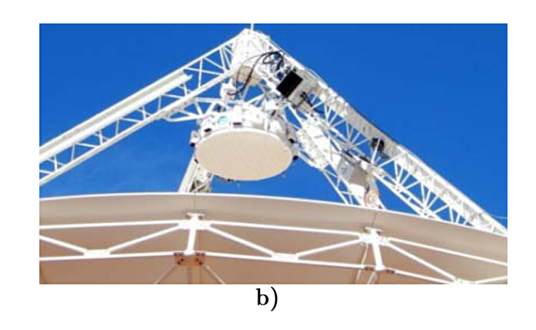
图 21 ASKAP 第一版棋盘式 PAF 及其安装的 12 m 天线

2012 年，澳方开启 ASKAP 第二阶段相控阵馈源样机 (MarkII) 的研制[43]。该 MarkII 馈源阵列由 94×2 个贴片偶极子单元组成 188 阵元，采用“自互补棋盘式”排列形式，工作频段为 700～1 800 MHz，系统瞬时带宽 300 MHz，采用数字波束合成技术[44]，大约可形成 30 个波束，在 1.4 GHz 生成 30 平方度的视场，允许巡天和深空探测[45]。该 PAF 样机于 2015 年研制完成 (见图 22 a))[46]，并于同年年底安装于 ASKAP 的 12 m 天线上并开展测试工作 (见图 22 b))。该 MkII PAF 样机使用 RFoF 方式，将所有阵列射频信号经光纤传输至

中央大楼，以此大大降低位于天线基座下方的电子设备及支撑系统的复杂性，但该方式也会产生大量的数据，数据传输速率每个天线约 2 Tb/s[47, 48]。



a)



b)

图 22　MkII PAF 样机及安装的 12 m 天线

在澳大利亚 CSIRO 研制 MarkII 的同时，德国马普射电所为 ASKAP 第二阶段也在开展 188 阵子 Mk II PAF 样机的研制工作。2016 年，由德国马普射电天文研究所 (Max Planck Institute for Radio Astronomy, MPIfR) 研制的 PAF 样机首次安装于澳大利亚 64 m Parks 射电望远镜并开展调试[49]，如图 23 a) 所示。该样机系统设计工作频率为 0.8～1.74 GHz，预计波束合成后的噪声温度在 45 K 到 60 K 之间，孔径效率在 70%～80% 之间，有效视场在 1 310 MHz 时为 1.4 deg^2。在澳大利亚 Parkes 64 m 天线上进行了 6 个月的试验观测后，该 PAF 样机又被安装在德国 Effelsberg 100 m 天线上开展试观测，上述工作也是天文学家在大型单面板射电望远镜上使用 PAF 开展科学观测的首次经历。考虑到在 Parkes 和 Effelsberg 观测可能会受到来自移动电话和数字电视信号的干扰，MPIfR 版 Mk II PAF 样机配备了更窄的采样滤波器，接收频率缩减至 1.2 ～1.75 GHz。在 Parkes 64 m 天线端，MPIfR 版 Mk II PAF 样机在 1 310 MHz 采用最大灵敏度波束合成算法在整个视场上采用归一化的灵敏度，如图 23 b) 所示。

上述 MkII PAF 样机在大型单面板望远镜上的成功测试，使得 CSIRO 开始考虑将实用型 PAF 接收机应用于大型单面板望远镜上，如 Parkes 64 m 射电望远镜，期望可以实现在 2~3 倍频程带宽范围内实现高灵敏度，且能够在几个波束宽度的视场内实现电扫描。在此需求下，CSIRO 于 2016 年开始研究一版基于类似火箭型的圆锥旋转体阵元 (Vivaldi 天线的优化版) 组成的 PAF 阵列 (Mk-III PAF)[50]。该阵列采用 5×4 方形结构 (见图 24 a))，双极化输出，每个极化在 E 面上有 5 个端口，沿 H 面有 4 个端口，考虑到低频的射频干扰，频率范围可优化扩展到600 ～1 800 MHz。当前版本设计仍为常温PAF，如果为低温制冷设计，该PAF接收机噪声温度可达15～20 K。Mk-III PAF样机于2016年5月安装于 Parkes 64 m 天线上 (见图 24 b))，测试人员使用斩波轮法测试接收机的噪声温度，采取最大信噪比的波束合成算法测试系统温度。Mk-III PAF 样机的波束合成网络 (见图24 c)) 采用无源、宽带、等振幅、等延迟、单极化设计，最终输出为一路合成后的信号[51]。这种模拟波束形成器结构简单，易于表征，性能稳定，非常适合 PAF 研制期间开展测试。在 Mk-III PAF 样机研制成功后，分别使用模拟和数字两种波束合成器在 Parkes 64 m 天线上进行了比对测试，并与

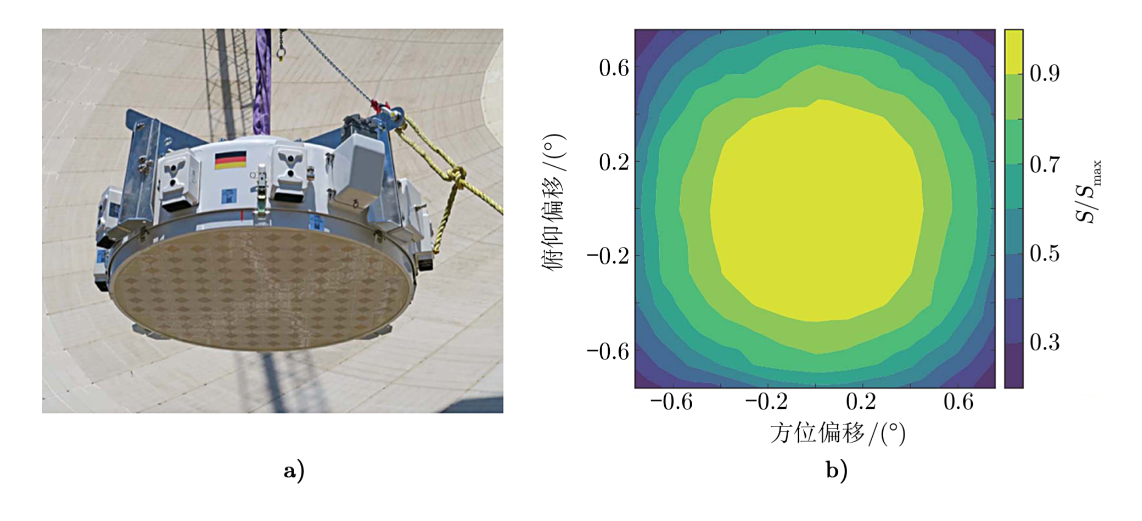


图 23 Parkes 上安装 MPIfR 版 MkII 及灵敏度测试结果

仿真结果进行了对比，用模拟波束形成法测量的系统噪声温度与仿真模拟结果非常一致，令人鼓舞。虽然该模拟波束形成器的简单性、极易测量结果和质量，使其成为 PAF 孔径阵列测试不可或缺的工具，但在 ASKAP 测试发现模拟波束合成器的实时性相对较慢，在综合孔径中应用仍有弊端。

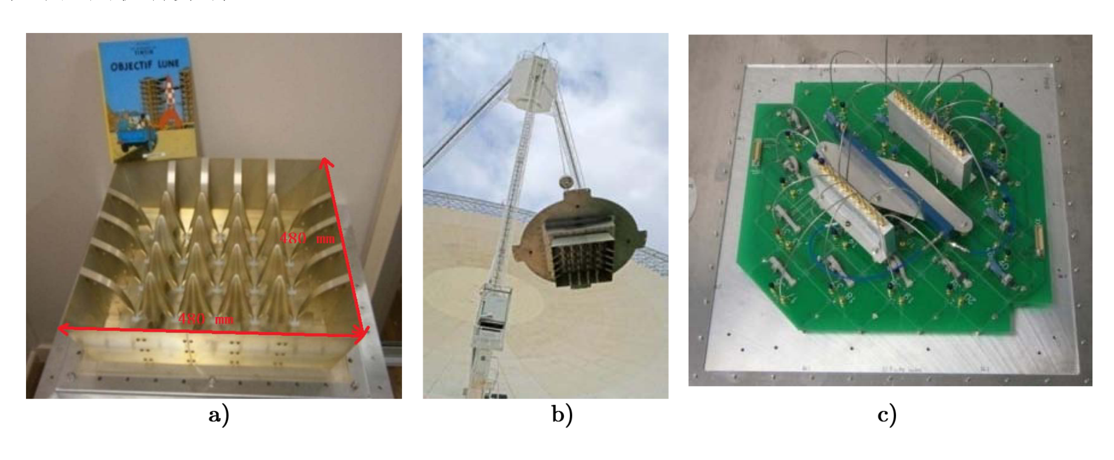


图 24 MkIII PAF 样机、64 m 天线安装及模拟波束合成器

2019 年，澳大利亚 CSIRO 开始为 Parkes 64 m 射电望远镜设计 600～1 950 MHz 的 98 阵元/196 通道低温制冷 PAF 样机，PAF 模型如图 25 所示。该 PAF 阵列包括间距为 80 mm 的火箭形状的阵元天线，并将 Mk-III PAF 样机版本的火箭型阵子进行优化以匹配低噪声放大器并提高波束合成效率。鉴于 Parkes 64 m 射电望远镜台址受观测波段低频端外部射频干扰影响严重，因此在制冷 PAF 设计时将添加一个阶跃滤波器，以抑制外部RFI并避免接收机饱和，同时以稍微升高系统噪声温度为代价来进行天文观测。由于射频干扰的影响，该制冷 PAF 的典型噪声贡献预计将提升 0.5 K (射频干扰带) 和 1.5 K (全频段)，使用 Parkes

64 m 望远镜系统噪声温度预计分别为 25 K 和 30 K。

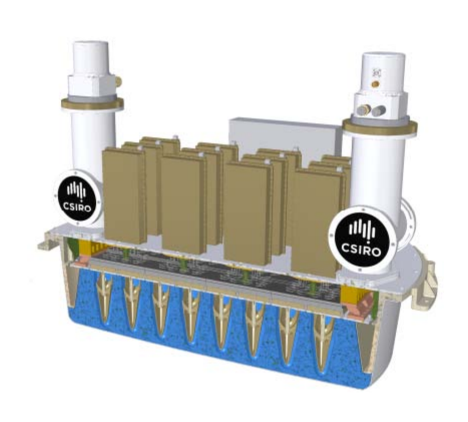


图 25　CSIRO 正在研制的 98 阵元制冷 PAF 模型

3.2　国内发展现状

近些年，随着国内大科学装置及前沿科学的驱动，我国在相控阵馈源技术方面也开展了大量的研究工作。上海台依托天马 65 m 射电望远镜，在卡焦式相控阵馈源技术方面进行了相关的研究和实验。国家台依托 FAST 工程，与中国电子科技集团公司第五十四研究所 (简称五十四所)、北京航空航天大学、南京理工大学等机构开展合作，针对 L 波段相控阵馈源开展了大量的研究。国家台和五十四所联合成立的射电天文技术联合实验室依托 SKA 工程，针对不同频段相控阵馈源开展了相关的研发工作。中国科学院新疆天文台 (简称新疆台) 依托拟建的奇台 110 m 射电望远镜，也已开展 0.7～1.8 GHz 的相控阵馈源预先研究。

3.2.1　天马 65 m 天线 PAF 设计

2013 年，上海台依托天马 65 m 射电望远镜开展了 PAF 的关键技术研究。与绝大多数主焦设计的长厘米波段 PAF 不同，上海台开展的是针对更高的工作频段 (6～9 GHz)、卡焦形式 PAF 的分析研究[52]。

通过对抛物面天线焦面场的仿真优化分析，初步确定 PAF 阵列设计。选取 Vivaldi 作为阵列单元，使用三层电路板工艺，中间层为馈电层，上下层增加了互通金属过孔，Vivaldi 天线单元后端采用带状线到同轴线的过渡方式连接同轴转接头；根据阵列特性，单元间距选取 9 GHz 对应波长的一半，以此达到对焦平面进行完全采样；初步确定 PAF 样机为 102×2 单元正交 vivaldi 天线阵列。实际 PAF 阵列仅加工了 8 列 (横、竖各 4 列) vivaldi 阵元，如图 26 所示。由于只是部分加工，集成效果与理想阵列图略有区别，但已可以实现波束扫描功能[53]。

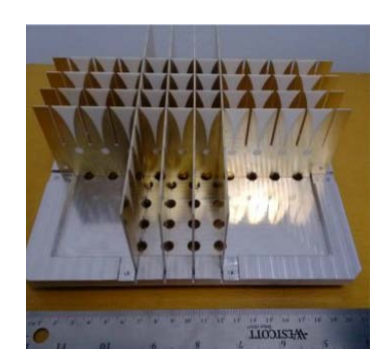


图 26　上海天文台 PAF 原理样机

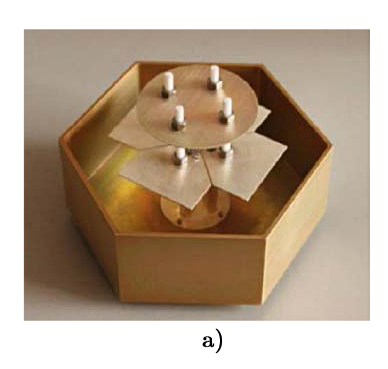
最终，研究人员对该 PAF 的 Vivaldi 天线阵列中心单元开展了基本的 S 参数测量，而

后利用共轭匹配的波束合成方法对该 PAF 原理样机进行了整机的性能测试。该项研究也是国内在大口径射电望远镜上开展 PAF 技术的首次探索。

3.2.2 FAST PAF 研制

国家台主持建造的“500 m 口径球面射电望远镜”，是利用贵州南部的喀斯特洼地的独特地形条件建设的世界上最大的单口径射电望远镜。目前，国家台 FAST 团队与五十四所[54]、北京航空航天大学、南京理工大学[55–58]等国内高校，以及国外 CSIRO 和 NRAO 等研究机构开展合作，正在开展 L 波段制冷相控阵馈源的研制工作。

FAST PAF 设计指标：工作频率为 1.05～1.45 GHz，瞬时带宽大于等于 500 MHz，视场为 0.6×0.6 平方度，瞬时波束数量大于等于 100 个，系统温度为 25 K，口径效率大于等于 55%[59, 60]。国家台与五十四所以射电天文技术联合实验室为依托，初步设计 PAF 阵列采用背腔阵子形式 (见图 27 a))，六边形排布，最终阵元数量为 217 个，阵元间距为 0.65 倍波长，双线极化输出，合成一个波束需要 37 个阵元，瞬时可以形成 100 个波束。目前，FAST 19 阵元 PAF 样机设计如图 27 b) 所示。


a)

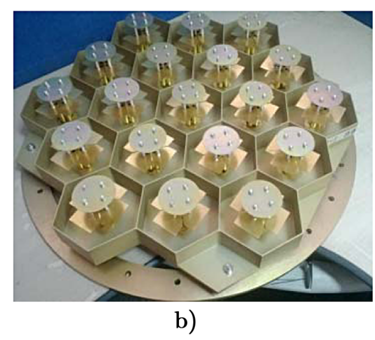
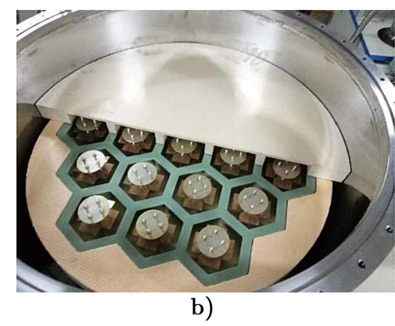
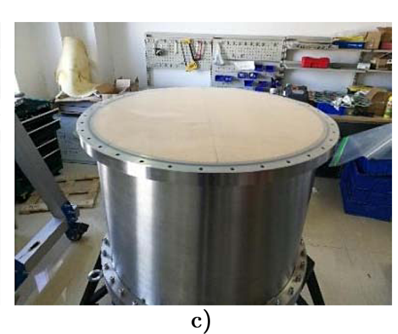

b)

图 27 背腔阵子及 FAST 19 阵元 PAF 样机

目前，研究人员正在开展 FAST PAF 的制冷设计[61]，如图 28 所示。


a)


b)


c)

注：a) 制冷设计下 19 阵元 PAF 样机，即将吊装安装外围杜瓦；b) 放置在制冷杜瓦内的 19 阵元 PAF 样机，其中大口径真空窗也是制冷设计一大难点；c) 安装后的 FAST PAF 样机，最上层为具备透波功能的隔热材料。

图 28 FAST 制冷 PAF 样机

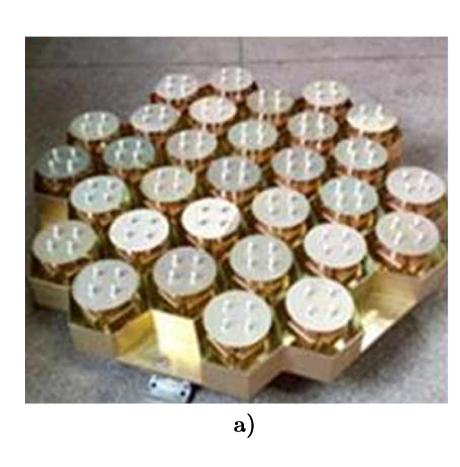
3.2.3 中国 SKA PAF 研制

在 SKA 诸多成员国中，中国在 SKA 发起、选址、工程概念及技术研发等方面均起到积极的推动作用[62]。目前，由国家台和五十四所联合成立的射电天文技术联合实验室正在开展 SKA 先导天线及相位阵馈源等关键技术研究[63]。其中，中国验证天线 (dish verification antenna-China, DVA-C) 是我国瞄准 SKA 反射面天线单元，结合国际先进设计理念与成熟工程经验研制的、具有自主知识产权的一架反射面天线样机 (如图 29 所示)[64]。该天线采用上偏置格利高里天线形式，主副反射面赋形设计；主副反射面均采用碳纤维材料、单块面板、整体成型技术制造工艺；天线转动采用方位转台、俯仰丝杠的座架设计；天线控制采用全数字化伺服控制系统提高系统的控制精度和可靠性。

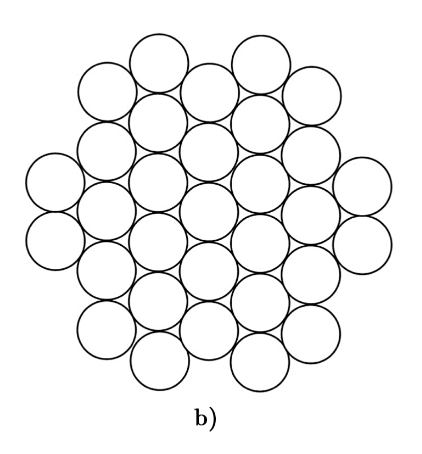


图 29 DAV-C 天线

射电天文技术联合实验室利用之前为 FAST 设计的背腔阵子 PAF 设计，结合最新设计的 DAV-C 天线，又设计出中国 SKA 项目中新的接收设备样机 (SKA DAV-C PAF)。图 30 是五十四所为 SKA DAV-C 设计的 PAF 样机。



a)



b)

注：a) 31 阵元实物图；b) 阵元布局图。

图 30 SKA DAV-C PAF 及阵元布局

之后，该实验室继续为 SKA 项目在 Ku 波段拟进行的多波束观测开展 PAF 设计。2019 年，五十四所针对具体的反射面天线，已经成功研制一工作在 Ku 频段的相控阵馈源样机，该样机采用开口波导作为阵列单元，一共 22 个单元。采用数字波束合成技术，在俯仰方向上形成了四个瞬时波束。通过仿真还可以得到单个波束的效率最高可达 74.7%，增益达到 63 dB，天线的噪声温度为 92 K，满足项目要求，单个波束的灵敏度为 1.077 $m^2 \cdot K^{-1}$，相邻波束性能基本一致[65]。

3.2.4 QTT PAF 预研

新疆台联合中国科学院和新疆维吾尔自治区，拟在新疆奇台县建设“110 米口径全向可动射电望远镜” (QiTai Telescope, QTT)[66]，QTT 模型如图 31 所示。根据科学目标和项目实施计划，初步计划配备五套高灵敏度制冷接收机，覆盖 0.27～30 GHz 的观测频率范围，其中 40 cm 波段 (0.27～1.8 GHz) 和 15 cm 波段 (0.7～4 GHz) 单波束接收机，以及 20 cm 波段 (0.7～1.8 GHz) 相控阵馈源接收机系统装备在 QTT 主焦点位置，5 cm 波段 (4～16 GHz) 和 2 cm 波段 (16～30 GHz) 单波束接收机装备在 QTT 格里高利焦点位置。后期拟陆续配备 13/3.6 cm, 3.6/0.9 cm, 1.3 cm, 7 mm 和 3 mm 波段 5 套高频接收机，共计 10 套接收机，工作频率覆盖 0.27～115 GHz，具备总功率、偏振、频谱、甚长基线干涉测量等多种观测模式。



图 31　QTT 模型

QTT 项目建设在即，相应的各个波段接收机的预研工作已经展开，其中 20 cm 波段 PAF 作为其中唯一一台相控阵馈源接收机，为大型射电望远镜使用相控阵馈源实现数十乃至上百个波束同时观测提供了可能。20 cm 波段相控阵馈源接收机主要由低温制冷前端、常温微波单元、信号采集与传输单元、电源与监控单元、校准单元、制冷系统和充气系统等组成，系统组成如图 32 所示[67]。

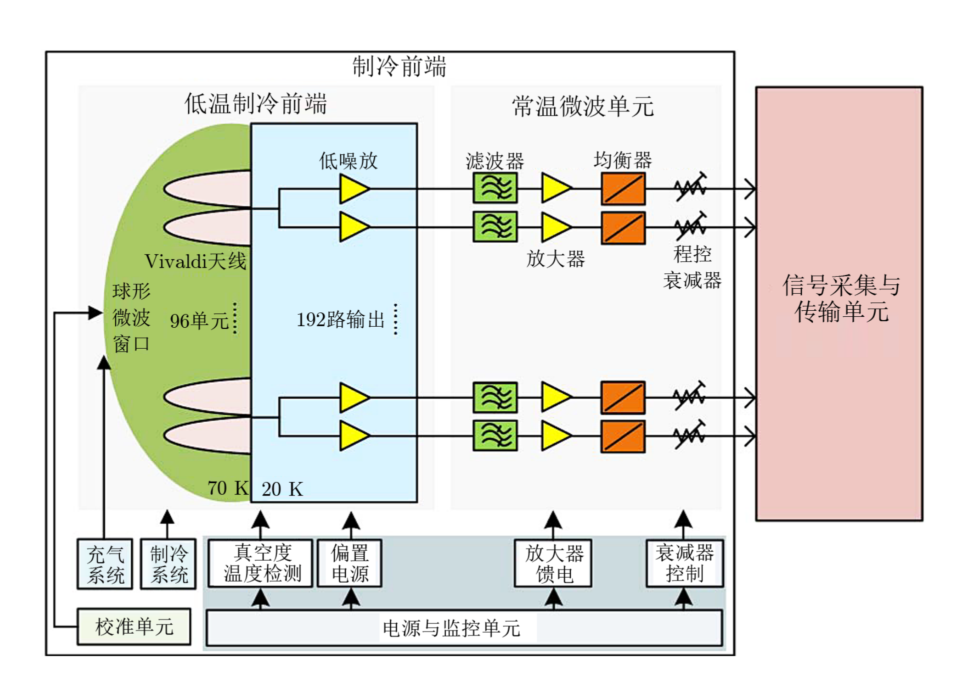


图 32　QTT 20 cm 波段 PAF 系统结构

QTT 20 cm 波段 PAF 接收机射频带宽 0.7～1.8 GHz，双线极化输出，为了尽可能降低接收机噪声温度，96 个单元馈源阵列和第一级低噪声放大器整体制冷，输出信号经滤波放大之后直接由数字化光纤传输，96 阵元布局如图 33 所示。目前，正在开展低温制冷前端设计。该 PAF 低温制冷前端是接收机的核心部分，其噪声温度指标决定了整个接收机系统的灵敏度。低温制冷前端由真空微波窗口、正交模耦合器、低温定向耦合器、低温隔离器、低温低噪声放大器与低温射频电缆组件及制冷机构成，制冷部件工作于 20 K 温区，外层加入温度为 77 K 的冷屏降低热辐射效率，进一步保证制冷器件的工作温度，整个低温微波单元封装在杜瓦内。

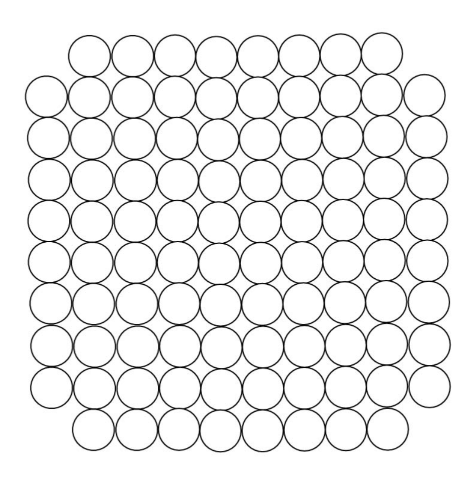


图 33　QTT 20 cm 波段 PAF 96 阵元布局

4　总结与展望

将 PAF 应用于焦平面阵列的优点在于其可以通过优化波束来提升望远镜在灵敏度、旁瓣和偏振特性方面的性能。与此同时，PAF 相较多波束技术在系统设计方面将面临着诸多挑战，例如采取阵列低噪放后级直接数字化，有助于提升系统的紧凑性，消除了同轴电缆或光纤链路复杂程度，但会增大数据量，另外还包括紧凑性、对外部射频干扰的敏感性、对通道隔离提供足够的信道、射频信号泄漏控制、制冷、重量和成本等方面。未来射电天文领域 PAF 的研究重点及主要挑战包括 PAF 阵列的数值模拟、PAF 接收机的噪声优化、PAF 的波束合成技术，以及 PAF 的阵列校准。

射电天文学的蓬勃发展正在积极推动着高灵敏度相控阵馈源的研究。大型单面板射电望远镜，如上海台天马望远镜、国家台 FAST、新疆台 QTT，以及大型射电望远镜阵列，如中国 SKA 项目，均在积极推动着国内相控阵馈源技术研发。随着射电天文观测需求的不断攀升，对相控阵馈源的性能也提出了更为严苛的要求，接收机研发人员将面临更大挑战，例如超宽带、低噪声、全制冷、实时数字信号处理等，这些需求已经成为相控阵馈源在未来

几年内的发展方向。相信在不远的未来，新一代 PAF 将会成为天文学家开展巡天观测的科学利器，也将使得对瞬态宇宙现象的研究成为可能。

参考文献：

[1] 甘恒谦, 金乘进, 张海燕, 等. 天文学报, 2005, 01: 108
[2] 伍洋. 博士论文. 西安电子科技大学, 2013: 21
[3] Bunton J D, Hay S G. International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications. Sydney: NSW, 2010: 729
[4] Ivashina M, van Ardenne J D B A. IEEE, 2002, 46: 279
[5] Ivashina M V, Kehn M N M, Kildal P, et al. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(2): 374
[6] Staveley-Smith L, Wilson W E, Bird T S, et al. PASP, 1995, 13(3): 244
[7] 曹逸庭, 沈惠波. 第八届全国毫米波亚毫米波学术会议, 1997: 2
[8] Dunning A, Bourne M, Bowen M, et al. URSI Asia-Pacific Radio Science Conference. New Delhi, India, 2019: 1
[9] Yngvesson K S, Johansson J F, Rahmat-Samii Y, et al. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1988, 36(11): 1638
[10] 伍洋, 杜彪, 金乘进, 等. 电波科学学报, 2013, 28(02): 348
[11] Natalia S. Theory of Classical Beamforming (Optimal Beamforming). https://docs.qq.com/pdf/DS0ViZnNtR3FlYlhW, 2015
[12] Ron E, John O. The development of focal plane arrays in radio astronomy. https://docs.qq.com/pdf/DS2t3Y2FueEV6T2lJ, 2017
[13] Fisher J R, Bradley R F. Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering, 2000, 4015: 309
[14] Warnick K F, Jeffs B D, Landon J, et al. 13th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics and the Canadian Radio Science Meeting. Toronto, IEEE, 2009: 2
[15] Warnick K F, Carter D, Webb T, et al. IEEE, 2011, 59: 1876
[16] Roshi D A, Warnick K F, Brandt J, et al. URSI General Assembly and Scientific Symposium, Beijing: Science Press, 2014: 1
[17] Roshi D A, Shillue W, Simon B, et al. AJ, 2018, 155(5): 202
[18] Roshi D A, Shillue W, Fisher J R. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2019, 67(5): 3015
[19] Groves W M, Morgan M A. PASP, 2016, 129(978): 085001
[20] Deboer D R, Gough R G, Bunton J D, et al. Proceedings of the IEEE. 2009, 97(8): 1509
[21] Cappellen W V, Vaate J G B D, Warnick K, et al. URSI General Assembly and Scientific Symposium, Istanbul, 2011: 3
[22] Ivashina M, Ardenne A V. IEEE, 2002, 43: 281
[23] Simons J, Vaate J G B D, Ivashina M V, et al. First European Conference on Antennas and Propagation, Nice, 2006: 6
[24] Vaate J G B D, Ivashina M V, Simons J, et al. Int. Ismos(Symp. Microw. Opt. Technol). Rome, Italy. 2008: 1
[25] Cappellen W A V, Bakker L. IEEE, 2011, 59: 644
[26] Cappellen W A V, Vaate J G B D. URSI General Assembly and Scientific Symposium. Beijing: Science Press, 2014: 2
[27] Hut B, Brink R H V D, Cappellen W A V. 11th European Conference on Antennas and Propagation, Paris: IEEE, 2017: 1960

[28] Navarrini A, Monari J, Scalambra A, et al. 2nd URSI Atlantic Radio Science Meeting, Meloneras, 2018: 2
[29] Navarrini A, Cattani A, Ladu A, et al. IEEE, 2019: 5
[30] Veidt B, Dewdney P. IEEE, 2005, 48: 2
[31] Gray A, Carlson B, Dougherty S, et al. URSI General Assembly and Scientific Symposium, Istanbul: IEEE, 2011: 2
[32] Veidt B, Burgess T, Messing R, et al. 13th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics and the Canadian Radio Science Meeting, Toronto, 2009: 2
[33] Veidt B, Hovey G J, Burgess T, et al. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(6): 2047
[34] Lacy G, Gray A. URSI General Assembly and Scientific Symposium, Istanbul: IEEE, 2011: 2
[35] Hovey G J, Burgess T, Carlson B, et al. URSI General Assembly and Scientific Symposium, Istanbul: IEEE, 2011: 2
[36] Veidt B, Burgess T, Yeung K, et al. 9th European Conference on Antennas and Propagation, Lisbon: IEEE, 2015: 2
[37] Belostotski L, Haslett J W, Veidt B, et al. 16th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics, Victoria: BC, 2014: 2
[38] Belostotski L, Beaulieu A J, Burgess T, et al. United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting, Boulder: CO, 2016: 2
[39] Beaulieu A J, Belostotski L, Burgess T, et al. IEEE, 2016, 15: 1720
[40] Bock D C. 1st URSI Atlantic Radio Science Conference. Las Palmas: IEEE, 2015: 1
[41] Hay S G, O'Sullivan J D. Radio Science, 2008, 43(6): 7
[42] Hay S G, O'Sullivan J D, Kot J S, et al. The Second European Conference on Antennas and Propagation, Edinburgh: IEEE, 2007: 2
[43] Hampson G, Macleod A, Beresford R, et al. International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, Cape Town: IEEE, 2012: 811
[44] Hampson G, Brown A, Pathikulangara J. URSI General Assembly and Scientific Symposium, Istanbul: IEEE, 2011: 2
[45] Chippendale A P, Hampson G A, Brown A J, et al.1st URSI Atlantic Radio Science Conference, Las Palmas: IEEE, 2015: 1
[46] Chippendale A P, Brown A J, Beresford R J, et al. International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, Turin: IEEE, 2015: 542
[47] Beresford R, Ferris D, Cheng W, et al. International Topical Meeting on Microwave Photonics, Beijing: Science Press, 2017: 3
[48] Beresford R, Cheng W, Hampson G, et al. General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science, Montreal: IEEE, 2017: 3
[49] Chippendale A P, Beresford R J, Deng X, et al. International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, Cairns: IEEE, 2016: 910
[50] Dunning A, Bowen M A, Hayman D B, et al.European Radar Conference, London: IEEE, 2016: 422
[51] Shaw R D. 11th European Conference on Antennas and Propagation, Paris: IEEE, 2017: 3833
[52] 何晨阳, 李斌. 中国科学院上海天文台年刊, 2013(34): 55
[53] 何晨阳. 硕士论文. 上海: 中国科学院上海天文台, 2013: 22
[54] 伍洋, 杜彪, 刘肖萌, 等. 电子与信息学报, 2013, 35(05): 1237
[55] 许露. 硕士论文. 南京: 南京理工大学, 2017: 33
[56] 许露, 韩玉兵, 汤蕾蕾, 等. 微波学报, 2016, 32(05): 46
[57] 仲洛清. 硕士论文. 南京: 南京理工大学, 2016: 45
[58] 汤蕾蕾. 硕士论文. 南京: 南京理工大学, 2015: 34
[59] 韩玉兵, Tran V, 汤蕾蕾, 等. 电波科学学报, 2016, 31(02): 223
[60] Han Y B, Zhong L Q, Aubert H. International Journal of Antennas and Propagation, 2016(02): 3
[61] 郭明雷. 硕士论文. 贵州: 贵州师范大学, 2018: 34
[62] 彭勃, 金乘进, 杜彪, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2012, 42(12): 1296

[63] 伍洋, 刘胜文, 杜彪, 等. 中国电子学会: 中国电子学会微波分会, 2015: 4
[64] 杜彪, 伍洋, 周建寨, 等. 中国科学: 信息科学, 2015, 45(8): 1006
[65] 牛晟璞, 杜彪. 计算机测量与控制, 2018, 26(03): 255
[66] 王娜. 中国科学: 物理学力学天文学, 2014, 44(8): 783
[67] 马军, 裴鑫, 王娜, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2019, 49(9): 11

Development Overview of Phased Array Feed Technology for Radio Astronomy

WANG Kai[1,2,3], CHEN Mao-zheng[1,2,3], MA Jun[1,2,3], NING Yun-wei[1,2,3], CAO Liang[1,2,3], YAN Hao[1,2,3], LI Jian[1,2,3], DUAN Xue-feng[1,2,3], XIANG Bin-bin[1,2]

(1. Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210033, China; 3. Xinjiang Key Laboratory of Microwave Technology, Urumqi 830011, China)

Abstract: Phased array feed is a new array antenna receiving system in the field of radio astronomy in recent years. It is a kind of small electric antenna unit array arranged in rectangular, hexagonal and other ways on the focal plane of radio telescope. It applies different excitation to each array element through beam combination, and regulates the amplitude and phase of each array element, so that each beam overlaps with each other and the phase center is close to each other. In order to improve the efficiency of sky survey, the focal plane area can be fully sampled to achieve continuous field of view coverage. Starting from focal plane array, this paper introduces the phased array feed and multi-beamed technology, and then describes in detail the advanced research of phased array feed technology development in the world, including NRAO in the United States, ASTRON in the Netherlands, DRAO in Canada and CSIRO in Australia, etc. And then introduces the technology pre-research and engineering practice of phased array feed which are carried out under the promotion of large scientific device and projects such as SKA. Finally, according to the development of existing phased array feed technology, the future research difficulties and development direction of this technology are proposed.

Key words: radio telescope; receiver; multi-beamed technology; phased array feed